

Obyčejné diferenciální rovnice (NMMA336)

Petr Velička *

přednášející: doc. RNDr. Tomáš Bárta, Ph.D. †

LS 2024/25

*petrvel@matfyz.cz

†bart@karlin.mff.cuni.cz

1 Lokální existence řešení

Diferenciální rovnice nás doprovází v každé oblasti lidského života. Neexistuje obecná teorie, která by nám umožnila vyřešit všechny diferenciální rovnice najednou. Musíme se proto omezit jen na část rovnic.

Úmluva 1.1. V této přednášce budeme studovat systém rovnic

$$x' = f(x, t) \quad (1)$$

za trvalého předpokladu $\Omega \in \mathbb{R}^{n+1}$ otevřená, $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ spojitá.

Definice 1.2. Buď I otevřený interval. Funkci $x(t) : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ nazveme *řešením* diferenciální rovnice (1) v Ω , jestliže pro všechna $t \in I$ platí

- (i) $(x(t), t) \in \Omega$,
- (ii) existuje vlastní $x'(t)$,
- (iii) $x'(t) = f(x(t), t)$.

Takto definované řešení je nutně spojitě a má spojitou derivaci (je třídy C^1), tzv. klasické řešení. Dále si poznamenejme, že platí tzv. princip nalepování: Pokud máme $x(t)$ řešení na (a, t_0) a na (t_0, b) , pak už je řešením na celém (a, b) . To plyne z toho, že $x'_-(t_0) = \lim_{t \rightarrow t_0^-} x'(t) = \lim_{t \rightarrow t_0^-} f(x(t), t) = f(x(t_0), t_0)$, přičemž tatáž rovnost platí i pro derivaci zprava.

Lemma 1.3. *Nechť I je otevřený interval, $x(t) : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ spojitá splňující $(x(t), t) \in \Omega$ pro každé $t \in I$ a nechť $t_0 \in I$. Potom je ekvivalentní*

- (i) x je řešení (1) splňující $x(t_0) = x_0$,
- (ii) pro každé $t \in I$ platí $x(t) = x_0 + \int_{t_0}^t f(x(s), s) ds$.

Důkaz. Víme, že platí $x'(s) = f(x(s), s)$ pro všechna $s \in I$, což je spojitá funkce, kterou můžeme zintegrovat na $[t_0, t]$. Potom z Newtonova-Leibnizova vzorce máme $x(t) - x(t_0) = \int_{t_0}^t x'(s) ds = \int_{t_0}^t f(x(s), s) ds$. Tedy $x(t) = x_0 + \int_{t_0}^t f(x(s), s) ds$.

Pro důkaz opačné strany si uvědomíme, že pro každé $t \in I$ je pravá strana diferencovatelná, tedy $x'(t) = f(x(t), t)$ a po dosazení $t = t_0$ dostáváme $x(t_0) = x_0$. \square

Teď si zadefinujeme několik pojmů, které charakterizují množiny funkcí, které se chovají jistým způsobem podobně nebo stejně.

Definice 1.4. Řekneme, že funkce množiny $M \subset C(K, \mathbb{R}^n)$ jsou

1. *stejně spojitě*, jestliže pro každé $x \in K$ a každé $\varepsilon > 0$ existuje $\delta > 0$ takové, že $\|f(x) - f(y)\| < \varepsilon$ pro všechna $y \in (x - \delta, x + \delta)$ a všechny $f \in M$.

2. *stejně omezené*, jestliže existuje $C > 0$ takové, že $\|f\| \leq C$ pro všechna $f \in M$.

Věta 1.5. (Arzela-Ascoli) *Nechť funkce $x_n(t)$ jsou stejně omezené a stejně spojitě na $[0, T]$. Potom z nich lze vybrat stejnoměrně konvergující posloupnost. (bez důkazu)*

Následující věta nám říká, že na nějakém okolí libovolného bodu existuje řešení zkoumané diferenciální rovnice.

Věta 1.6. (Peano) *Nechť $(x_0, t_0) \in \Omega$. Pak existuje $\delta > 0$ a funkce $x(t) : (t_0 - \delta, t_0 + \delta) \rightarrow \mathbb{R}^n$, která je řešením (1) a splňuje $x(t_0) = x_0$.*

Důkaz. Nejdříve dokážeme pomocné tvrzení:

Lemma 1.7. *Pokud $\Omega = \mathbb{R}^{n+1}$ a f je omezená na Ω , pak pro každé $T > 0$ existuje řešení (1) na $(t_0 - T, t_0 + T)$ splňující $x(t_0) = x_0$.*

Důkaz. Řešme “porušenou” úlohu (P_λ) : $x(t) = x_0 + \int_{t_0}^t f(x(s - \lambda), s) ds$ pro $t > t_0$ a $x(t) = x_0$ pro $t \in [t_0 - \lambda, t_0]$. Na $I_1 := (t_0, t_0 + \lambda]$ definujeme $x(t) = x_0 + \int_{t_0}^t f(x(s - \lambda), s) ds$. Na $I_2 := (t_0 + \lambda, t_0 + 2\lambda]$ definujeme $x(t)$ obdobně a indukcí pokračujeme až do nekonečna. Tímto je “porušená” úloha vyřešena na $[t_0 - \lambda, t_0 + T]$.

Položme $\lambda = \frac{1}{n}$ pro $n = 1, 2, \dots$. Pišme dále jen x_n namísto $x_{1/n}$, tedy máme posloupnost funkcí. Ukážeme, že jsou stejně spojitě a stejně omezené. Stejná omezenost plyne z toho, že $\|x_n(t)\| = \|x_0 + \int_{t_0}^t f(x(s - \frac{1}{n}), s) ds\| \leq \|x_0\| + \int_{t_0}^t \|f(x(s - \frac{1}{n}), s)\| ds$. Ale funkce f je omezená, tedy máme $\|x_n(t)\| \leq \|x_0\| + (T - t_0) \cdot K$, kde K je příslušná konstanta omezenosti f . Stejnou spojitost máme z odhadu $\|x_n(t) - x_n(r)\| = \|\int_r^t f(x(s - \frac{1}{n}), s) ds\| \leq |t - r| \cdot K$. V poslední nerovnosti jsme odhadli integrál součinem délky intervalu a konstantou omezenosti funkce f . Stačí položit $\delta = \frac{\epsilon}{K}$, potom $\|x_n(t) - x_n(r)\| < \delta K = \epsilon$.

Tedy dle Věty 1.5 můžeme z posloupnosti x_n vybrat stejnoměrně konvergentní podposloupnost. Zbývá dokázat, že její limita řeší naši rovnici.

konec 1. přednášky (21.2.2025)

□

□